

---

---

## ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

---

---

УДК 681.586.776:621.382

В.С. ОСАДЧУК, О.В. ОСАДЧУК, О.М. ЛЬЧЕНКО

### МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ГУСТИНИ ОПТИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ З АКТИВНИМ ІНДУКТИВНИМ ЕЛЕМЕНТОМ

*Вінницький національний технічний університет  
Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, 21021, Україна,  
тел.: (0432)59-80-13, E-mail: alenail\_86@mail.ru*

**Анотація.** Показана можливість перетворення густини оптичної потужності на основі автогенераторного пристрою, який складається з транзисторних структур з від'ємним опором, і в якому фоточутливим елементом є фотодіод. Отримані аналітичні залежності вольт-амперної характеристики, функції перетворення та рівняння чутливості, які можуть бути використані для інженерного розрахунку параметрів перетворювачів оптичної потужності.

**Annotation.** In article the opportunity of transformation of optical power density is shown on the basis of the self-oscillator which will consist of transistor structures with negative resistance, and which also contains the photodiode as photosensitive element. Analytical dependences of current-voltage characteristic, of transformation function and the sensitivity equation, which can be used for the engineering calculation of optical power convertors parameters, are received.

**Аннотация.** Показана возможность преобразования плотности оптической мощности на основе автогенераторного устройства, которое состоит из транзисторных структур с отрицательным сопротивлением, и в котором фоточувствительным элементом является фотодиод. Получены аналитические зависимости вольт-амперной характеристики, функции преобразования и уравнения чувствительности, которые могут быть использованы для инженерного расчета параметров преобразователей оптической мощности.

**Ключові слова:** частотний перетворювач, фотодіод, оптичне випромінювання, вольт-амперна характеристика, повний опір, функція перетворення

#### ВСТУП

Стрімкий розвиток сенсорної техніки висуває нові вимоги фоточутливих перетворювачів. Зокрема, вони повинні бути економічними, забезпечувати високу точність вимірювання, мати мінімальні габарити і вагу, бути сумісними з сучасними ЕОМ [1]. Цим вимогам відповідають фоточутливі перетворювачі, у яких інформативним параметром є частота. Адже такі перетворювачі характеризуються високою завадостійкістю, простотою та значною точністю перетворення в цифровий код, а також зручністю комутацій в багатоканальних вимірювальних системах [2, 3].

Актуальність дослідження перетворювачів саме оптичного типу підкреслюється необхідністю їх використання в системах вимірювання рівня рідини. Вимірювання рівня рідини є важливим питанням контролю стану середовища [4]. Оптичні сенсори не вимагають електричного контакту з досліджуваною рідиною. Таким чином, оптичні сенсори можуть бути виготовлені з відносно простою конструкцією [5]. Крім того, оптичні сенсори на основі транзисторних структур з від'ємним опором з вихідним частотним сигналом в системах вимірювання рівня рідини забезпечують високу точність [6]. Тому у цій роботі досліджуються характеристики оптичного перетворювача на основі автогенераторного пристрою, в якому коливальний контур утворено на основі ємнісної складової повного вихідного опору, а роль індуктивної

складової виконує біполярний транзистор з RC-колом.

### ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Самозбудження і стійкість роботи автогенератора зумовлені вибором робочої точки на вольт-амперній характеристиці, тому в даній роботі визначається вольт-амперна характеристика перетворювача на основі еквівалентної схеми та складених для неї рівнянь Кірхгофа.

На рис. 1 показана схема оптичного частотного перетворювача на основі польового транзистора VT1 і біполярного транзистора VT2 з чутливим елементом – фотодіодом. Ємність коливального контуру автогенератора утворюється ємністю складовою повного опору на електродах стік-колектор польового транзистора VT1 і біполярного транзистора VT2. Індуктивність реалізується індуктивною складовою повного опору на електродах емітер-колектор біполярного транзистора VT3. В цій схемі в якості індуктивності використовується біполярний транзистор VT3 з фазозсувним колом R4C2, що дозволяє виготовити її за інтегральною технологією.

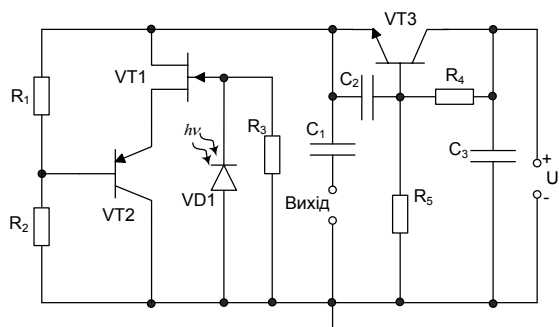


Рис. 1. Схема мікроелектронного перетворювача густини оптичної потужності з активним індуктивним елементом:  $U_1$  – напруга живлення

Для визначення вольт-амперної характеристики складемо еквівалентну схему по постійному струму (рис. 2).

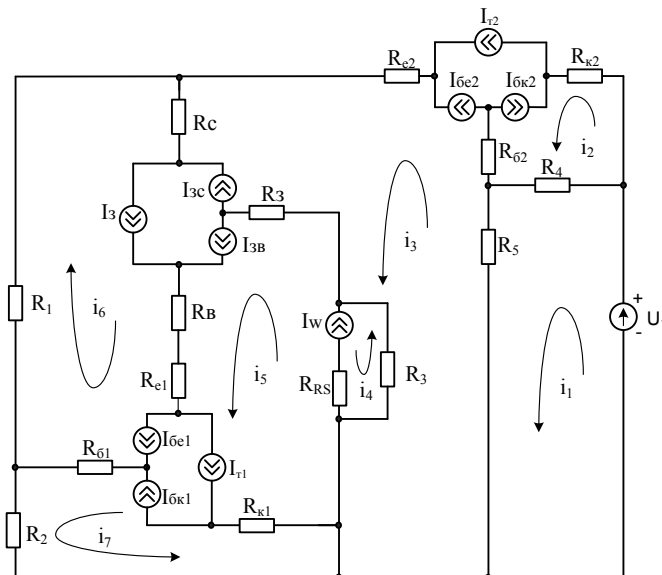


Рис. 2. Еквівалентна схема оптичного перетворювача по постійному струму

Елементи еквівалентної схеми описуються такими величинами:  $R_a$  – опір бази;  $R_e$  – опір колекторного переходу;  $R_d$  – опір емітерного переходу;  $R_c$  – омичний опір електрода затвора;  $R_n$  – опір р-п переходу стоку;  $R_d$  – опір р-п переходу витоку;  $R_{RS}$  – базовий опір діода;  $R_1, R_2$  – опори дільника;  $R_L$  – опір індуктивності коливального контуру;  $I_{ae}$  – струм база-колектор;  $I_{aa}$  – струм база-емітер;  $I_{cn}$  – струм затвор-стік;  $I_{ca}$  – струм затвор-витік.

Для цієї схеми складемо систему рівнянь Кірхгофа:

$$\left\{ \begin{aligned}
 U_1 &= (R_4 + R_5)i_1 + R_4(-i_2 + {}^2_{\dot{a}\dot{e}2} + {}^2_{\dot{o}2} - {}^2_{\dot{a}\dot{a}2}) + R_5(-{}^3_3 + {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{n}} + {}^2_{\dot{\varsigma}} - {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{a}} - {}^2_{\dot{a}\dot{a}2} + {}^2_{\dot{o}2} + {}^2_{\dot{a}\dot{e}2}) \\
 0 &= (R_{\dot{e}2} + R_{\dot{a}2} + R_4)(i_2 + {}^2_{\dot{a}\dot{a}2} - {}^2_{\dot{o}2} - {}^2_{\dot{a}\dot{e}2}) - R_4i_1 + \\
 &+ R_{\dot{a}2}(-i_3 + {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{n}} + {}^2_{\dot{\varsigma}} - {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{a}} - {}^2_{\dot{a}\dot{a}2} + {}^2_{\dot{o}2} + {}^2_{\dot{a}\dot{e}2}) \\
 0 &= (R_{\dot{a}2} + R_{\dot{n}} + R_{\dot{\varsigma}} + R_3 + R_5 + R_{\dot{a}2})(i_3 - {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{n}} - {}^2_{\dot{\varsigma}} + {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{a}} + {}^2_{\dot{a}\dot{a}2} - {}^2_{\dot{o}2} - {}^2_{\dot{a}\dot{e}2}) + \\
 &+ R_{\dot{n}}(i_6 + {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{n}} + {}^2_{\dot{\varsigma}} - {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{a}} + {}^2_{\dot{a}\dot{a}1} - {}^2_{\dot{o}1} - {}^2_{\dot{a}\dot{e}1}) + R_{\dot{\varsigma}}(-i_5 - I_w + {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{n}} + {}^2_{\dot{\varsigma}} - {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{a}} + {}^2_{\dot{a}\dot{a}1} - {}^2_{\dot{o}1} - {}^2_{\dot{a}\dot{e}1}) + \\
 &+ R_3(-i_4 + I_w) - R_5{}^3_1 \\
 0 &= (R_3 + R_{RS})(i_4 - I_w) + R_3(-i_3 + {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{n}} + {}^2_{\dot{\varsigma}} - {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{a}} - {}^2_{\dot{a}\dot{a}2} + {}^2_{\dot{o}2} + {}^2_{\dot{a}\dot{e}2}) + \\
 &+ R_{RS}(-i_5 - I_w + {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{n}} + {}^2_{\dot{\varsigma}} - {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{a}} + {}^2_{\dot{a}\dot{a}1} - {}^2_{\dot{o}1} - {}^2_{\dot{a}\dot{e}1}) \\
 0 &= (R_{\dot{\varsigma}} + R_{RS} + R_{\dot{e}1} + R_{\dot{a}1} + R_{\dot{a}})(i_5 + I_w - {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{n}} - {}^2_{\dot{\varsigma}} + {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{a}} - {}^2_{\dot{a}\dot{a}1} + {}^2_{\dot{o}1} + {}^2_{\dot{a}\dot{e}1}) + \\
 &+ R_{\dot{\varsigma}}(-i_3 + {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{n}} + {}^2_{\dot{\varsigma}} - {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{a}} - {}^2_{\dot{a}\dot{a}2} + {}^2_{\dot{o}2} + {}^2_{\dot{a}\dot{e}2}) + R_{RS}(-i_4 + I_w) + \\
 &+ R_{\dot{e}1}(-i_7 + {}^2_{\dot{a}\dot{a}1} - {}^2_{\dot{o}1} - {}^2_{\dot{a}\dot{e}1}) + (R_{\dot{a}1} + R_{\dot{a}})(i_6 + {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{n}} + {}^2_{\dot{\varsigma}} - {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{a}} + {}^2_{\dot{a}\dot{a}1} - {}^2_{\dot{o}1} - {}^2_{\dot{a}\dot{e}1}) \\
 0 &= (R_1 + R_{\dot{n}} + R_{\dot{a}} + R_{\dot{a}1} + R_{\dot{a}1})(i_6 + {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{n}} + {}^2_{\dot{\varsigma}} - {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{a}} + {}^2_{\dot{a}\dot{a}1} - {}^2_{\dot{o}1} - {}^2_{\dot{a}\dot{e}1}) + \\
 &+ (R_{\dot{a}} + R_{\dot{a}1})(i_5 + I_w - {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{n}} - {}^2_{\dot{\varsigma}} + {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{a}} - {}^2_{\dot{a}\dot{a}1} + {}^2_{\dot{o}1} + {}^2_{\dot{a}\dot{e}1}) + \\
 &+ R_{\dot{n}}(i_3 - {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{n}} - {}^2_{\dot{\varsigma}} + {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{a}} + {}^2_{\dot{a}\dot{a}2} - {}^2_{\dot{o}2} - {}^2_{\dot{a}\dot{e}2}) + R_{\dot{a}1}(i_7 - {}^2_{\dot{a}\dot{a}1} + {}^2_{\dot{o}1} + {}^2_{\dot{a}\dot{e}1}) \\
 0 &= (R_2 + R_{\dot{a}1} + R_{\dot{e}1})(i_7 - {}^2_{\dot{a}\dot{a}1} + {}^2_{\dot{o}1} + {}^2_{\dot{a}\dot{e}1}) + R_{\dot{a}1}(i_6 + {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{n}} + {}^2_{\dot{\varsigma}} - {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{a}} + {}^2_{\dot{a}\dot{a}1} - {}^2_{\dot{o}1} - {}^2_{\dot{a}\dot{e}1}) + \\
 &+ R_{\dot{e}1}(-i_5 - I_w + {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{n}} + {}^2_{\dot{\varsigma}} - {}^2_{\dot{\varsigma}\dot{a}} + {}^2_{\dot{a}\dot{a}1} - {}^2_{\dot{o}1} - {}^2_{\dot{a}\dot{e}1})
 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Струм, який протікає у вихідному колі еквівалентної схеми, визначається як

$$\begin{aligned}
 i_{\dot{a}\dot{e}\dot{o}} = {}^3_1 &= \frac{\hat{A}_1}{\hat{A}_{16}} + \frac{R_4\hat{A}_2}{\hat{A}_2\hat{A}_{16}} + \frac{R_4R_{\dot{a}2}\hat{A}_3}{\hat{A}_2\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} + \frac{R_4R_{\dot{a}2}\hat{A}_{13}\hat{A}_5}{\hat{A}_2\hat{A}_{11}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} + \frac{R_4R_{\dot{a}2}\hat{A}_{14}\hat{A}_4}{\hat{A}_2\hat{A}_{12}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} + \frac{R_4R_{\dot{a}2}\hat{A}_{14}R_{RS}\hat{A}_5}{\hat{A}_2\hat{A}_{11}\hat{A}_{12}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} + \frac{R_4R_{\dot{a}2}\hat{A}_{14}R_{RS}R_{\dot{e}1}\hat{A}_7}{\hat{A}_2\hat{A}_8\hat{A}_{11}\hat{A}_{12}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} - \\
 &- \frac{R_4\hat{A}_{15}\hat{A}_6}{\hat{A}_{16}} + \frac{R_4R_{\dot{a}2}\hat{A}_{14}R_{RS}R_{\dot{e}1}R_{\dot{a}1}\hat{A}_7}{\hat{A}_2\hat{A}_8^2\hat{A}_{10}\hat{A}_{11}\hat{A}_{12}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} + \frac{R_4R_{\dot{a}2}\hat{A}_{14}R_{RS}\hat{A}_6R_{\dot{a}1}\hat{A}_7}{\hat{A}_2\hat{A}_8\hat{A}_{10}\hat{A}_{11}\hat{A}_{12}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} + \frac{R_4R_{\dot{a}2}\hat{A}_{13}R_{\dot{e}1}\hat{A}_7}{\hat{A}_2\hat{A}_8\hat{A}_{11}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} + \\
 &+ \frac{R_4R_{\dot{a}2}\hat{A}_{13}R_{\dot{e}1}R_{\dot{a}1}^2\hat{A}_7}{\hat{A}_2\hat{A}_8^2\hat{A}_{10}\hat{A}_{11}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} + \frac{R_4R_{\dot{a}2}\hat{A}_{13}\hat{A}_6R_{\dot{a}1}\hat{A}_7}{\hat{A}_2\hat{A}_8\hat{A}_{10}\hat{A}_{11}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} + \frac{R_4R_{\dot{a}2}R_{\dot{n}}R_{\dot{a}1}\hat{A}_7}{\hat{A}_2\hat{A}_8\hat{A}_{10}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} + \frac{R_5\hat{A}_3}{\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} - \frac{R_5R_{\dot{n}}\hat{A}_6}{\hat{A}_{10}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} + \\
 &+ \frac{R_5\hat{A}_{13}\hat{A}_5}{\hat{A}_{11}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} + \frac{R_5\hat{A}_{14}\hat{A}_4}{\hat{A}_{12}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} + \frac{R_5\hat{A}_{14}R_{RS}\hat{A}_5}{\hat{A}_{11}\hat{A}_{12}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} + \frac{R_5\hat{A}_{14}R_{RS}R_{\dot{e}1}\hat{A}_7}{\hat{A}_8\hat{A}_{11}\hat{A}_{12}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} - \frac{R_5\hat{A}_{14}R_{RS}R_{\dot{e}1}R_{\dot{a}1}\hat{A}_6}{\hat{A}_8\hat{A}_{10}\hat{A}_{11}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} + \\
 &+ \frac{R_5\hat{A}_{14}R_{RS}R_{\dot{e}1}R_{\dot{a}1}^2\hat{A}_7}{\hat{A}_8^2\hat{A}_{10}\hat{A}_{11}\hat{A}_{12}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} - \frac{R_5\hat{A}_{14}R_{RS}\hat{A}_6\hat{A}_6}{\hat{A}_{10}\hat{A}_{11}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} + \frac{R_5\hat{A}_{14}R_{RS}\hat{A}_6R_{\dot{a}1}\hat{A}_7}{\hat{A}_8\hat{A}_{10}\hat{A}_{11}\hat{A}_{12}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} + \frac{R_5\hat{A}_{13}R_{\dot{e}1}\hat{A}_7}{\hat{A}_8\hat{A}_{11}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} - \\
 &- \frac{R_5\hat{A}_{13}R_{\dot{e}1}R_{\dot{a}1}\hat{A}_6}{\hat{A}_8\hat{A}_{10}\hat{A}_{11}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} + \frac{R_5\hat{A}_{13}R_{\dot{e}1}R_{\dot{a}1}^2\hat{A}_7}{\hat{A}_8^2\hat{A}_{10}\hat{A}_{11}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} - \frac{R_5\hat{A}_{13}\hat{A}_6\hat{A}_6}{\hat{A}_{10}\hat{A}_{11}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} + \frac{R_5\hat{A}_{13}\hat{A}_6R_{\dot{a}1}\hat{A}_7}{\hat{A}_8\hat{A}_{10}\hat{A}_{11}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}} + \frac{R_5R_{\dot{n}}R_{\dot{a}1}\hat{A}_7}{\hat{A}_8\hat{A}_{10}\hat{A}_{14}\hat{A}_{16}},
 \end{aligned} \quad (2)$$

Параметри еквівалентної схеми перетворювача, необхідні для розрахунку ВАХ, отримані з роботи [7]. На рис. 3 подано теоретичну та експериментальну ВАХ даного перетворювача.

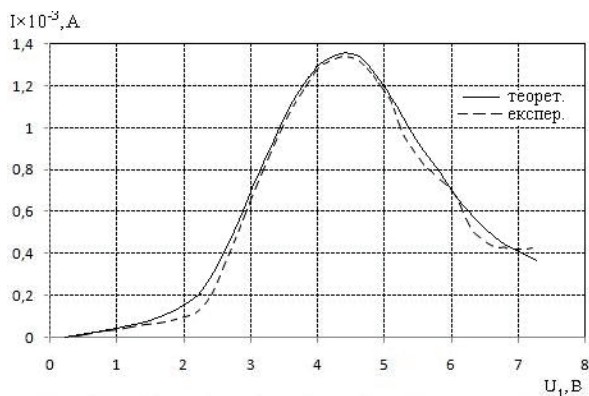


Рис. 3. Теоретична та експериментальна ВАХ частотно-оптичного перетворювача

З залежності видно, що ділянка від'ємного опору лежить в межах від 4,5 до 7,2 В напруги живлення. Для експериментальних досліджень була виготовлена гібридна мікросхема транзисторної структури з від'ємним опором. В гібридній інтегральній схемі були застосовані кристали біполярних транзисторів 2N3906 і КТ368БМ та польового транзистора КП303.

### ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА РІВНЯННЯ ЧУТЛИВОСТІ

Для визначення функції перетворення перетворювача необхідно розрахувати повний опір на електродах стік-колектор польового і біполярного транзисторів VT1 і VT2 згідно з його еквівалентною схемою для змінного струму (рис. 4).

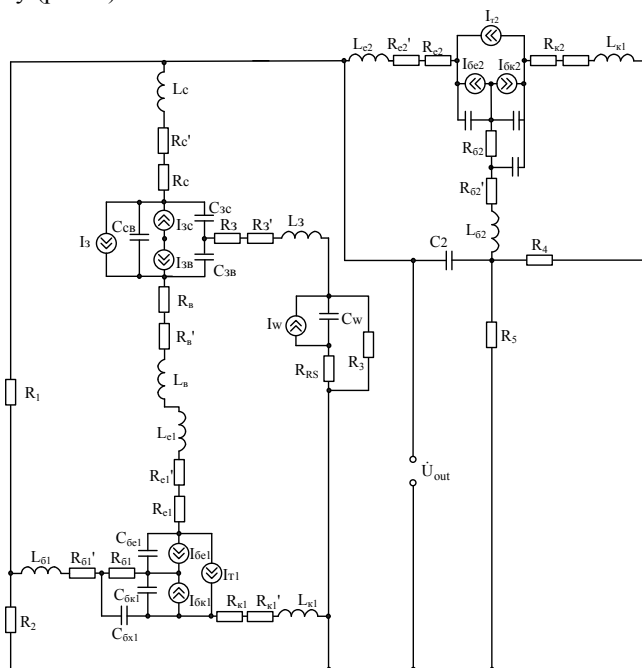


Рис. 4. Еквівалентна схема оптичного перетворювача по змінному струму

Перетворимо її у зручнішу для проведення розрахунків (рис. 5) схему.

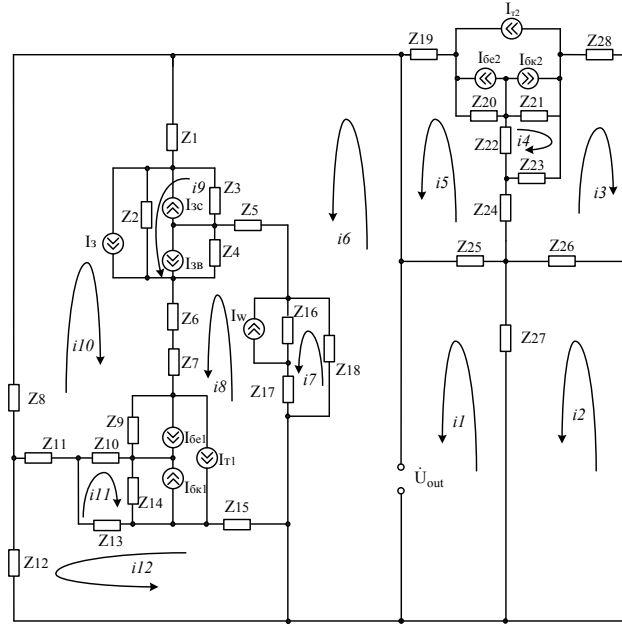


Рис. 5. Перетворена еквівалентна схема оптичного перетворювача по змінному струму

Система рівнянь Кірхгофа згідно з перетвореною еквівалентною схемою по змінному струму має вигляд:

$$\begin{cases}
 \dot{U}_{out} = (Z_{25} + Z_{27})i_1 - Z_{25}i_5 - Z_{27}i_2, \\
 0 = (Z_{27} + Z_{26})i_2 - Z_{27}i_1 + Z_{26}i_3, \\
 0 = (Z_{26} + Z_{24} + Z_{23} + Z_{28})i_3 + Z_{26}i_2 + Z_{24}i_5 - Z_{23}i_4, \\
 0 = (Z_{22} + Z_{21} + Z_{23})i_4 + Z_{22}i_5 + Z_{21}(I_{\dot{a}\dot{a}2} - I_{\dot{a}\dot{e}2} + I_{\dot{O}2}) - Z_{23}i_3, \\
 0 = (Z_{19} + Z_{20} + Z_{22} + Z_{24} + Z_{25})i_5 + Z_{20}(-I_{\dot{a}\dot{a}2} + I_{\dot{a}\dot{e}2} - I_{\dot{O}2}) + \\
 + Z_{22}i_4 + Z_{24}i_3 - Z_{25}i_1, \\
 \dot{U}_{out} = (Z_1 + Z_3 + Z_5 + Z_{18})i_6 + Z_{11}i_{10} - Z_3i_9 + Z_3(I_{\dot{\varphi}\dot{n}} - I_{\dot{\varphi}\dot{a}} - I_{\dot{\varphi}}) - \\
 - Z_5i_8 - Z_{18}i_7, \\
 0 = (Z_{16} + Z_{18} + Z_{17})i_7 + Z_{16}i_w - Z_{18}i_6 - Z_{17}i_8, \\
 0 = (Z_5 + Z_4 + Z_7 + Z_9 + Z_{14} + Z_{15} + Z_{17} + Z_{16})i_8 - Z_5i_6 + Z_4(I_{\dot{\varphi}\dot{n}} - I_{\dot{\varphi}\dot{a}} - I_{\dot{\varphi}}) + \\
 + (Z_6 + Z_7 + Z_9)i_{10} + Z_9(-I_{\dot{a}\dot{a}1} + I_{\dot{a}\dot{e}1} - I_{\dot{O}1}) + Z_{14}i_{11} + Z_{14}(-I_{\dot{a}\dot{a}1} + I_{\dot{a}\dot{e}1} - I_{\dot{O}1}) - \\
 - Z_{15}i_{12} - (Z_{17} + Z_{16})i_7 - Z_{16}i_w, \\
 0 = (Z_2 + Z_3 + Z_4)i_9 + Z_2i_{10} + Z_2(I_{\dot{\varphi}\dot{n}} - I_{\dot{\varphi}\dot{a}} - I_{\dot{\varphi}}) - Z_3i_6 + Z_3(-I_{\dot{\varphi}\dot{n}} + I_{\dot{\varphi}\dot{a}} + I_{\dot{\varphi}}) - \\
 - Z_4i_8 + Z_4(-I_{\dot{\varphi}\dot{n}} + I_{\dot{\varphi}\dot{a}} + I_{\dot{\varphi}}), \\
 0 = (Z_1 + Z_2 + Z_6 + Z_7 + Z_9 + Z_{10} + Z_{11} + Z_8)i_{10} + Z_1i_6 + Z_2i_9 + Z_2(I_{\dot{\varphi}\dot{n}} - I_{\dot{\varphi}\dot{a}} - I_{\dot{\varphi}}) + \\
 + (Z_6 + Z_7 + Z_9)i_8 + Z_9(-I_{\dot{a}\dot{a}1} + I_{\dot{a}\dot{e}1} - I_{\dot{O}1}) - Z_{10}i_{11} + Z_{11}i_{12}, \\
 0 = (Z_{10} + Z_{13} + Z_{14})i_{11} - Z_{10}i_{10} + Z_{13}i_{12} + Z_{14}i_8 + Z_{14}(-I_{\dot{a}\dot{a}1} + I_{\dot{a}\dot{e}1} - I_{\dot{O}1}), \\
 0 = (Z_{11} + Z_{12} + Z_{15} + Z_{13})i_{12} + Z_{11}i_{10} - Z_{15}i_8 + Z_{13}i_{11}.
 \end{cases} \quad (3)$$

де  $Z_1 = (R_{\dot{n}} + R'_{\dot{n}}) + j\omega L_{\dot{n}}, \quad Z_2 = -j/(\omega C_{\dot{n}\dot{a}}), \quad Z_3 = -j/(\omega C_{\dot{\varphi}\dot{n}}), \quad Z_4 = -j/(\omega C_{\dot{\varphi}\dot{a}}),$   
 $Z_5 = (R_{\dot{\varphi}} + R'_{\dot{\varphi}}) + j\omega L_{\dot{\varphi}}, \quad Z_6 = (R_{\dot{a}} + R'_{\dot{a}}) + j\omega L_{\dot{a}}, \quad Z_7 = (R_{\dot{a}1} + R'_{\dot{a}1}) + j\omega L_{\dot{a}1}, \quad Z_8 = R_1,$   
 $Z_9 = -j/(\omega C_{\dot{a}\dot{a}1}), \quad Z_{10} = R_{\dot{a}1}, \quad Z_{11} = R'_{\dot{a}1} + j\omega L_{\dot{a}1}, \quad Z_{12} = R_2, \quad Z_{13} = -j/(\omega C_{\dot{a}\dot{a}1}),$

$Z_{14} = -j / (\omega C_{\dot{a}\dot{e}1})$ ,  $Z_{15} = (R_{\dot{e}1} + R'_{\dot{e}1}) + j\omega L_{\dot{e}1}$ ,  $Z_{16} = -j / (\omega C_w)$ ,  $Z_{17} = R_{RS}$ ,  $Z_{18} = R_3$ ,  
 $Z_{19} = R_{\dot{a}2} + R'_{\dot{a}2} + j\omega L_{\dot{a}2}$ ,  $Z_{20} = -j / (\omega C_{\dot{a}\dot{a}2})$ ,  $Z_{21} = -j / (\omega C_{\dot{a}\dot{e}2})$ ,  $Z_{22} = R_{\dot{a}2}$ ,  
 $Z_{23} = -j / (\omega C_{\dot{a}\dot{o}2})$ ,  $Z_{24} = R'_{\dot{a}2} + j\omega L_{\dot{a}2}$ ,  $Z_{25} = -j / (\omega C)$ ,  $Z_{26} = R_4$ ,  $Z_{27} = R_5$ , де  $R'_a, R'_a, R'_e$  -  
 омичний опір базового, емітерного і колекторного переходів відповідно;  $L_{\dot{a}}, L_{\dot{a}}, L_{\dot{e}}$  - індуктивність  
 базового, емітерного і колекторного переходів відповідно;  $L_{\dot{c}}, L_{\dot{n}}, L_{\dot{a}}$  - індуктивність електрода затвор,  
 стік, витік;  $C_{\dot{a}\dot{a}}, C_{\dot{a}\dot{e}}$  - ємність емітерного і колекторного переходів;  $C_{\dot{a}\dot{o}}$  - вхідна ємність транзистора;  
 $C_{\dot{c}\dot{n}}, C_{\dot{c}\dot{a}}, C_{\dot{n}\dot{a}}$  - ємність затвор-стік, затвор-витік, стік-витік;  $R_1, R_2$  - опори діляника,  $R_3$  -  
 навантажувальний опір,  $R_{\dot{c}}$  - омичний опір електрода затвора,  $R_{\dot{n}}$  - опір р-п переходу стоку,  $R_{\dot{a}}$  - опір р-  
 п переходу витіку,  $\tilde{N}_w$  - ємність фотодіода,  $R_{\dot{a}1}, R_{\dot{e}1}, R_{\dot{a}1}$  - об'ємний опір бази, колектора і емітера  
 транзистора VT3,  $I_w$  - фотострум сонячного елемента,  $R_4$  і  $\tilde{N}$  - опір та ємність резистора та  
 конденсатора фазозсувного кола відповідно.

Система рівнянь (3) розв'язана за допомогою пакету прикладних програм "Matlab 5.2", що дозволило отримати значення повного опору, активна складова якого має від'ємне значення, а реактивна - ємнісний характер. На рис. 6 та рис. 7 показані розрахункові та експериментальні залежності активної складової повного опору та ємнісної реактивної складової повного опору від густини потужності оптичного випромінювання відповідно.

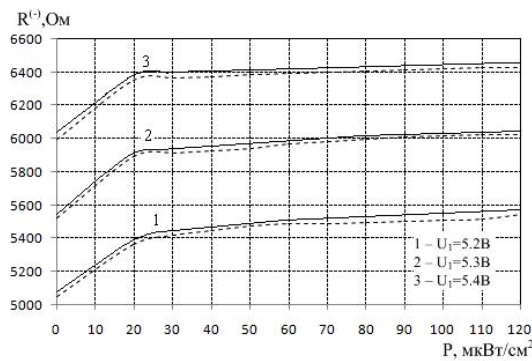


Рис. 6. Теоретичні та експериментальні залежності активної складової повного опору від густини потужності оптичного випромінювання

З рис. 6 видно, що зі збільшенням напруги живлення  $U_1$  та густини оптичної потужності  $P$  активна складова повного опору збільшується. Так при  $U_1 = 5,2\text{В}$  діапазон зміни активної складової, при зміні  $P$  від 0 до  $120 \text{ мВт/см}^2$ , становить 495 Ом, а при  $U_1 = 5,4\text{В}$  - 428 Ом.

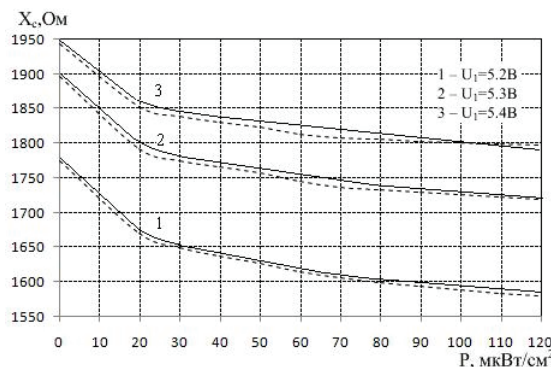


Рис. 7. Теоретичні та експериментальні залежності ємнісної реактивної складової повного опору від густини потужності оптичного випромінювання

Рис. 7 показує, що зі збільшенням напруги живлення  $U_1$  ємнісна реактивна складова повного опору збільшується, а зі збільшенням густини оптичної потужності  $P$  - зменшується. Так при  $U_1 = 5,2\text{В}$  діапазон зміни ємнісної реактивної складової, при зміні  $P$  від 0 до  $120 \text{ мВт/см}^2$ , становить 196 Ом, а при

$U_1 = 5,4\hat{A} - 145$  Ом. Аналіз графіків показує, що найбільша зміна як активної, так і реактивної складової повного опору відбувається при зміні густини потужності оптичного випромінювання від 0 до  $20\hat{i} \hat{e}\hat{A}\hat{o} / \hat{m}^2$ .

Для визначення функції перетворення необхідно на основі розв'язку системи рівнянь Кірхгофа (3) знайти залежність частоти генерації від густини потужності оптичного випромінювання. Функція перетворення в цьому випадку буде мати вигляд

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_w(P) \cdot C_{\hat{c}\hat{a}} + C_w(P) \cdot C_{\hat{n}\hat{a}} + C_{\hat{n}\hat{a}} \cdot C_{\hat{c}\hat{a}}}{L_{\hat{a}\hat{e}\hat{a}} \cdot C_w(\hat{D}) \cdot \hat{N}_{\hat{n}\hat{a}} \cdot \hat{N}_{\hat{c}\hat{a}}}} \quad (4)$$

В формулі (4)  $L_{\hat{a}\hat{e}\hat{a}}$  – еквівалентна індуктивність активного індуктивного елемента (рис. 8), утвореного транзистором VT3 та фазозсувним колом на основі резистора  $R_4$  та конденсатора  $\tilde{N}_2$ .  $L_{\hat{a}\hat{e}\hat{a}}$  визначається як уявна частина повного опору індуктивного елемента.

Для визначення повного опору складемо систему рівнянь Кірхгофа:

$$\begin{cases} U_1 = (Z_{27} + Z_{26})i_1 + Z_{26}i_5 - Z_{27}i_2, \\ 0 = (Z_{27} + Z_{25})i_2 - Z_{27}i_1 - Z_{25}i_3, \\ 0 = (Z_{19} + Z_{25} + Z_{22} + Z_{20})^3 i_3 - Z_{25}i_2 + Z_{22}i_4 + Z_{20}(-I_{\hat{a}\hat{a}2} + I_{\hat{a}\hat{e}2} - I_{\hat{o}2}), \\ 0 = (Z_{22} + Z_{21} + Z_{23})^3 i_4 + Z_{22}i_3 + Z_{21}(I_{\hat{a}\hat{a}2} - I_{\hat{a}\hat{e}2} + I_{\hat{o}2}) - Z_{23}^3 i_5, \\ 0 = (Z_{28} + Z_{23} + Z_{26})^3 i_5 - Z_{23}^3 i_4 + Z_{26}i_1. \end{cases} \quad (5)$$

де  $\hat{A}_1 = Z_{27} + Z_{26}$ ,  $\hat{A}_2 = Z_{27} + Z_{25}$ ,  $\hat{A}_3 = Z_{19} + Z_{25} + Z_{22} + Z_{20}$ ,  $\hat{A}_4 = Z_{20}(-I_{\hat{a}\hat{a}2} + I_{\hat{a}\hat{e}2} - I_{\hat{o}2})$ ,  
 $\hat{A}_5 = Z_{22} + Z_{21} + Z_{23}$ ,  $\hat{A}_6 = Z_{21}(I_{\hat{a}\hat{a}2} - I_{\hat{a}\hat{e}2} + I_{\hat{o}2})$ ,  $\hat{A}_7 = Z_{28} + Z_{23} + Z_{26}$ .

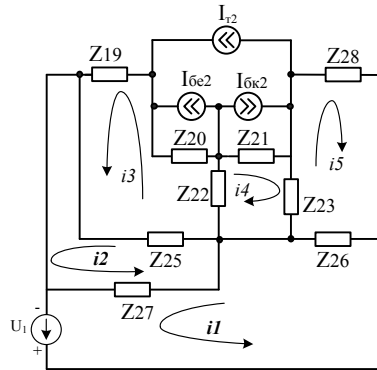


Рис. 8. Перетворена еквівалентна схема активного індуктивного елемента по змінному струму

Розв'язавши систему рівнянь (5) відносно струму  $\hat{i}_1$ , визначимо повний опір транзисторного еквівалента індуктивності:

$$\begin{aligned} Z_{\hat{a}\hat{e}\hat{a}} = \frac{U_1}{\hat{i}_1} = U_1 / \left( \frac{\hat{A}_2 U_1}{Z_{27} \hat{A}_1} + \frac{\hat{A}_2 \hat{A}_1 Z_{25}^2 U_1}{\hat{A}_1^2 Z_{27}^2 \hat{A}_2} - \frac{\hat{A}_2 \hat{A}_1 Z_{25} \hat{A}_3 \hat{A}_6 U_1}{\hat{A}_1^2 \hat{A}_2 Z_{27}^2 \hat{A}_5} - \frac{\hat{A}_2 \hat{A}_1 Z_{25} \hat{A}_3 \hat{A}_4 \hat{A}_4}{\hat{A}_1 \hat{A}_2^2 Z_{27}^2 \hat{A}_5} - \frac{\hat{A}_2 \hat{A}_1 Z_{25} \hat{A}_3 Z_{22} \hat{A}_4}{\hat{A}_1 \hat{A}_2^2 Z_{27}^2 \hat{A}_5} + \right. \\ \left. + \frac{\hat{A}_2 \hat{A}_1 Z_{25} \hat{A}_3 \hat{A}_6}{\hat{A}_1 \hat{A}_2 Z_{27}^2 \hat{A}_5} - \frac{\hat{A}_2 Z_{26} \hat{A}_6 U_1}{Z_{27} \hat{A}_1 \hat{A}_5} - \frac{\hat{A}_2 Z_{26} \hat{A}_4 \hat{A}_4}{Z_{27} \hat{A}_1 \hat{A}_2 \hat{A}_5} - \frac{\hat{A}_2 Z_{26} Z_{22} \hat{A}_4}{Z_{27} \hat{A}_1 \hat{A}_2 \hat{A}_5} + \frac{\hat{A}_2 Z_{26} \hat{A}_6}{Z_{27} \hat{A}_1 \hat{A}_5} - \right. \\ \left. - \frac{\hat{A}_2 \hat{A}_1 Z_{25} Z_{22} U_1 Z_{26}}{\hat{A}_1^2 Z_{27}^3 Z_{23} \hat{A}_2} - \frac{\hat{A}_2 \hat{A}_1 Z_{25} \hat{A}_4}{\hat{A}_1 \hat{A}_2 Z_{27}^2} - \frac{Z_{25}^2 U_1}{\hat{A}_1 \hat{A}_2 Z_{27}} + \frac{Z_{25} \hat{A}_3}{Z_{27} \hat{A}_2} + \frac{Z_{25} Z_{22} U_1 Z_{26} \hat{A}_2}{Z_{23} Z_{27}^2 \hat{A}_1 \hat{A}_2} + \frac{Z_{25} \hat{A}_4}{Z_{27} \hat{A}_2} \right). \end{aligned}$$

де  $\hat{A}_1 = \frac{\hat{A}_1 \hat{A}_2}{Z_{27}} - Z_{27}$ ,  $\hat{A}_2 = \frac{Z_{22} \hat{A}_1 \hat{A}_2 Z_{25} Z_{26}}{Z_{23} \hat{A}_1 Z_{27}^2} - \frac{Z_{22} Z_{26} Z_{25}}{Z_{23} Z_{27}} - \frac{\hat{A}_1 Z_{25}^2}{\hat{A}_1 Z_{27}} + \hat{A}_3$ ,

$$\hat{A}_3 = \frac{Z_{25}Z_{26}}{\hat{A}_1} + \frac{Z_{22}\hat{A}_7}{Z_{23}} - \frac{Z_{22}\hat{A}_2Z_{26}^2}{Z_{23}Z_{27}\hat{A}_1}, \quad \hat{A}_4 = \frac{\hat{A}_1\hat{A}_2\hat{A}_5Z_{25}Z_{26}}{Z_{23}\hat{A}_1Z_{27}^2} - \frac{\hat{A}_5Z_{26}Z_{25}}{Z_{23}Z_{27}},$$

$$\hat{A}_5 = \frac{\hat{A}_5\hat{A}_7}{Z_{23}} - \frac{\hat{A}_5\hat{A}_2Z_{26}^2}{Z_{23}Z_{27}\hat{A}_1} - \frac{\hat{A}_3\hat{A}_4}{\hat{A}_2} - \frac{Z_{22}\hat{A}_3}{\hat{A}_2} - Z_{23},$$

$$\hat{A}_6 = -\frac{\hat{A}_4Z_{25}}{\hat{A}_2} + \frac{\hat{A}_4Z_{22}Z_{26}\hat{A}_2}{Z_{23}Z_{27}\hat{A}_2} - \frac{Z_{22}Z_{25}}{\hat{A}_2} + \frac{Z_{22}^2Z_{26}\hat{A}_2}{Z_{23}Z_{27}\hat{A}_2} - \frac{\hat{A}_5Z_{26}\hat{A}_2}{Z_{23}Z_{27}}.$$

Залежність частоти генерації від густини потужності оптичного випромінювання, визначена експериментально та розрахована за формулою (4) для випромінювання з довжиною хвилі 850 нм, показана на рис. 9.

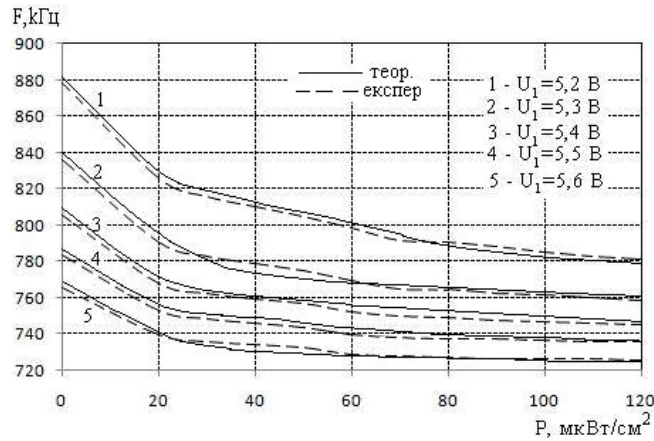


Рис. 9. Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації від густини потужності оптичного випромінювання

Аналіз графіка показує, що зі збільшенням густини оптичної потужності спостерігається зменшення частоти генерації. Розбіжність теоретичної та експериментальної складової не перевищує  $\pm 5\%$ .

Чутливість перетворювача, отримана з виразу (4), визначається з формули:

$$S_P^F = \frac{1}{4} \frac{L_{\hat{a}\hat{e}\hat{a}} \cdot C_w(P) \cdot \tilde{N}_{\hat{n}\hat{a}} \cdot \tilde{N}_{\hat{c}\hat{a}}}{\pi \sqrt{\frac{C_w(P) \cdot C_{\hat{c}\hat{a}} + C_w(P) \cdot C_{\hat{n}\hat{a}} + C_{\hat{n}\hat{a}} \cdot C_{\hat{c}\hat{a}}}{L_{\hat{a}\hat{e}\hat{a}} \cdot C_w(P) \cdot \tilde{N}_{\hat{n}\hat{a}} \cdot \tilde{N}_{\hat{c}\hat{a}}}}} \frac{(\tilde{N}_{\hat{c}\hat{a}} + C_{\hat{n}\hat{a}}) \cdot \left( \frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) (C_w(P) \cdot C_{\hat{c}\hat{a}} + C_w(P) \cdot C_{\hat{n}\hat{a}} + C_{\hat{n}\hat{a}} \cdot C_{\hat{c}\hat{a}}) \cdot \left( \frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right)}{L_{\hat{a}\hat{e}\hat{a}} \cdot C_w(P)^2 \cdot \tilde{N}_{\hat{n}\hat{a}} \cdot \tilde{N}_{\hat{c}\hat{a}}} \quad (6)$$

На рис. 10 зображена залежність чутливості оптичного перетворювача від величини густини оптичної потужності.

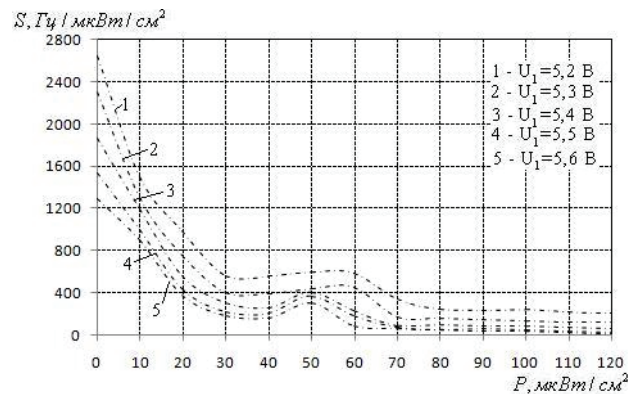


Рис. 10. Залежність чутливості перетворювача від густини оптичної потужності

Теоретичні та експериментальні залежності показали, що чутливість розробленого оптичного



перетворювача складає  $0,3 - 2,65 \text{ В} / \text{В}^2$ . Максимальну чутливість перетворювач має при напрузі живлення 5,2 В.

### ВИСНОВКИ

1. Отримано аналітичний вираз вольт-амперної характеристики на основі системи рівнянь Кірхгофа, складених для еквівалентної схеми оптичного перетворювача на основі польового і біполярного транзисторів. Розбіжність теоретичних та експериментальних результатів становить  $\pm 5\%$ .
2. Графічна залежність вихідного струму  $I_{\text{вд}}$  від напруги живлення  $U_1$  доводить, що на електродах стік-колектор польового і біполярного транзисторів існує від'ємний опір. Самозбуждення і стійкість роботи автогенератора зумовлені вибором робочої точки на вольт-амперній характеристиці.
3. Отримано аналітичний вираз функції перетворення та рівняння чутливості на основі системи рівнянь Кірхгофа, складених для еквівалентної схеми оптичного перетворювача на основі автогенератора з польовим і біполярним транзисторами та активним індуктивним елементом на основі біполярного транзистора з фазозсувним RC-колом. Розбіжність теоретичних та експериментальних результатів становить  $\pm 5\%$ .
4. Графічна залежність частоти генерації від густини оптичної потужності доводить, що частота генерації більша в діапазоні від  $0 - 20 \text{ В} / \text{В}^2$ , а в діапазоні від  $20 - 120 \text{ В} / \text{В}^2$  змінюється лінійно. При цьому чутливість розробленого оптичного перетворювача складає  $0,3 - 2,65 \text{ В} / \text{В}^2$ .

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Осадчук А.В. Фоточувствительные преобразователи на основе структур с отрицательным сопротивлением: монография / Александр Владимирович Осадчук. – Винница: Континент, 1998. – 130 с.
2. Новицкий П.В., Кноринг В.Г., Гутников В.С. Цифровые приборы с частотными датчиками / П.В. Новицкий, В.Г. Кноринг, В.С. Гутников. – Л.: Энергия, 1970. – 424 с.
3. Осадчук О.В. Микроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / О.В. Осадчук. – Винница: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. – 302 с.
4. Хансуваров К.И. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара: Учебное пособие для техникумов / К.И. Хансуваров, В.Г. Цейтлин. – М.: Издательство стандартов, 1990. 287 с.
5. Патент США № 7161165B2, МПК5 G01F 23/292. Optical transducer for continuously determining liquid level/ Alvin R. Wirthlin. - № 10/886174; Заявл. 07.07.2004; Оpubл. 09.01.2007.
6. Осадчук А.В. Фоточувствительные преобразователи на основе структур с отрицательным сопротивлением: монография/ А.В. Осадчук. – Винница: Континент, 1998. – 130 с.
7. Разевиг В.Д. Применение программ P-CAD и PSpICE для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Выпуск 2. Модели компонент аналоговых устройств/ В.Д. Разевиг. – М.: Радио и связь, 1992. – 72 с.

Надійшла до редакції 20.10.2010р.

**ОСАДЧУК В. С.** – д.т.н., професор, кафедра електроніки Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна.

**Осадчук О. В.** – д.т.н., професор, завідувач кафедри радіотехніки, Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна.

**ІЛЬЧЕНКО О. М.** – аспірант кафедри електроніки Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна.